

Анализ динамики образования жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги

Гашков Михаил Алексеевич

*Гашков Михаил Алексеевич, Зубарев Николай Михайлович, Месяц Геннадий Андреевич,
Уйманов Игорь Владимирович*

Институт электрофизики УрО РАН

Зубарев Николай Михайлович

gashkov@iep.uran.ru

Основные свойства вакуумного дугового разряда определяются процессами, происходящими в небольшой ярко светящейся области на катоде – в катодном пятне. Оно является источником жидкометаллических струй и капель, создающих условия для инициирования взрывной электронной эмиссии при их взаимодействии с катодной плазмой. Это обеспечивает условия для самоподдержания вакуумного дугового разряда. Система струй образуется по краям кратера при вытеснении расплавленного металла давлением катодной плазмы [1]. В работе [2] был предложен механизм образования струй, связанный с развитием азимутальных неустойчивостей границы расплавленного металла. Сделанные оценки показали, что за формирование микроструй может быть ответственна как неустойчивость Рэлея-Плато (РП), так и неустойчивость Рэлея-Тэйлора (РТ).

В настоящей работе на основе комбинирования численного и аналитического подходов к описанию гидродинамических процессов в катодном пятне вакуумной дуги удалось однозначно установить механизм формирования жидкометаллических струй. Использовалась методика численного моделирования процесса вытеснения расплавленного металла из кратера, предложенная в работе [3]. Подробно рассматривалась ситуация образования кратера радиусом ~ 0.8 мкм на медном катоде при электрическом токе дуги в 3.2 А (минимальный ток разряда 1.6 А [1]). Анализ показал, что наибольший рост возмущений соответствует гармонике $n=11$ и происходит в результате развития неустойчивости РП. Амплитуда азимутального возмущения поверхности жидкометаллического вала за 25 нс вырастает примерно в 5 раз, в то время как для неустойчивости РТ – только в 3 раза. Это свидетельствует о том, что именно неустойчивость РП ответственна за формирование жидкометаллических струй в катодном пятне вакуумной дуги. Работа выполнена в рамках темы гос. задания 0389-2014-0005/6 при поддержке РФФИ (проекты 17-08-00943, 17-08-00430, 16-08-00228) и Президиума РАН (программа № 9 «Электрофизика и электроника мощных импульсных систем»).

Список публикаций:

[1] Г. А. Месяц. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга.* // М.: Наука, 2000. С. 424.

[2] G. A. Mesyats, N. M. Zubarev. // *J. Appl. Phys.* 2015, V.117, P. 203301.

[3] Г. А. Месяц, И. В. Уйманов. // *Известия вузов. Физика*, 2015, Т. 58, №9-2, С.204.

Исследование электронной компоненты потока заряженных частиц из ионного источника типа end-Hall

Демьяненко Александр Витальевич

Новосибирский государственный университет

Золкин Александр Степанович, к.ф.-м.н.

alex.demy@yandex.ru

Введение. В процессах синтеза нанопокровов, получаемых с помощью ионных источников, важной характеристикой являются свойства потока, осаждаемого на поверхность роста: функция распределения заряженных частиц по энергиям, плотность потока, соотношение между положительно и отрицательно заряженной компонентой в потоке. В процессе роста диэлектрических покрытий, таких как алмазоподобные плёнки (DLC), это особенно критично, так как поверхность роста может накапливать заряд, например, за счёт ионного потока. При этом скорость роста покрытия может изменяться, а в отдельных случаях – прекращаться. Присутствие в потоке электронной компоненты способствует компенсации положительного пространственного и поверхностного заряда в процессе роста DLC. Исследование потока в области синтеза даёт полезную информацию для понимания особенностей роста DLC при различных параметрах ионного источника.

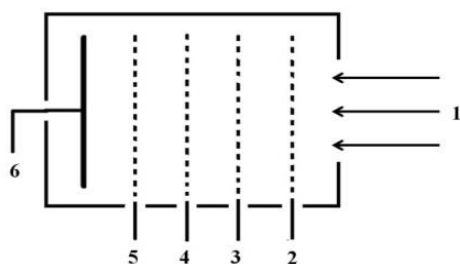


рис.1. Принципиальная схема многосеточного электростатического зонда. 1 – поток частиц, 2 – экранирующая сетка, 3 – отсекающая сетка, 4 – анализирующая сетка, 5 – антидинаatronная сетка, 6 – коллектор.

Методика. Для изучения свойств потока использовался электростатический многосеточный зонд, схема которого представлена на рис. 1. При исследовании электронной компоненты на отсекающую сетку 3 подаётся положительный потенциал $U_3 = +300$ В для полной отсеки ионной компоненты пучка. Его величина зависит от потенциала анода ионного источника $U_A = +250$ В. Изменение потенциала анализирующей сетки 4 позволяет получить интегральную зависимость потока электронной компоненты и долю потока с определённой энергией. Антидинаatronная сетка 5 подавляет вторичную электронную эмиссию с коллектора 6, которая может искажать величину измеряемой электронной компоненты. При исследовании ионной компоненты на отсекающую сетку подаётся потенциал $U_3 = -300$ В для отсеки электронной компоненты в потоке.

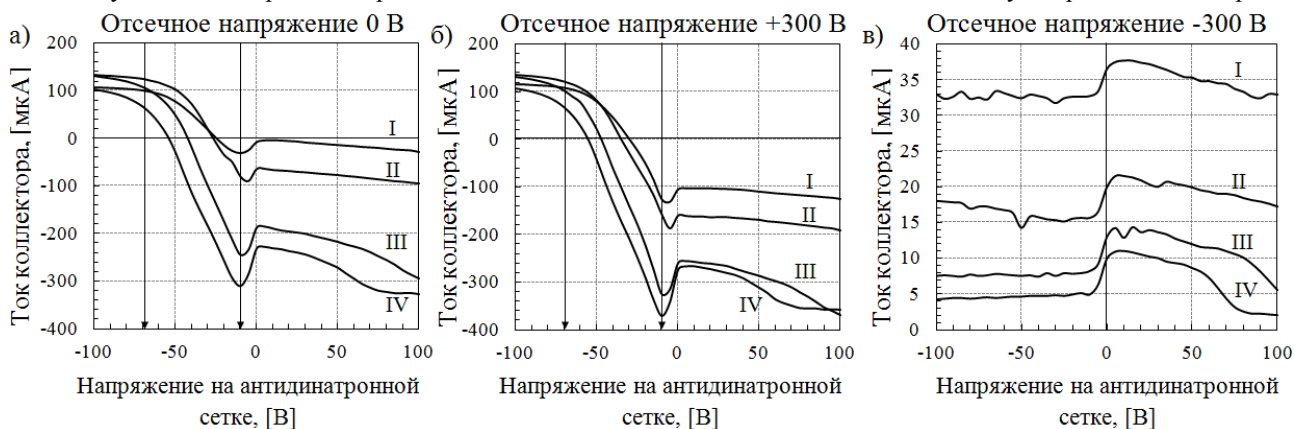
Результаты и обсуждение. В зависимостях тока коллектора от напряжения на антидинаatronной сетке и при нулевом отсекающем напряжении $U_3 = 0$ В (рис. 2а) и напряжении $U_3 = +300$ В (рис. 2б) можно выделить две основных области: область положительного и отрицательного коллекторного тока. Область положительного коллекторного тока характеризуется линейным участком насыщения тока коллектора в диапазоне напряжений от $U_5 = -99,9$ В до $U_5 = -70$ В на антидинаatronной сетке. В этом диапазоне напряжений все эмитированные электроны возвращаются обратно на коллектор. Напряжение $U_5 = -70$ В соответствует точке перегиба, после которой ток коллектора стремительно уменьшается до нулевого. Это объясняется уменьшением количества

рис.2. Зависимость тока коллектора от напряжения на антидинаatronной сетке при различных расходах газа. а – режим полного пропускания, б – режим увеличения электронной компоненты, в – режим увеличения ионной компоненты. Расход газа: I – 9 мл/мин, II – 15 мл/мин, III – 21 мл/мин, IV – 27 мл/мин.

возвращаемых антидинаatronной сеткой электронов и возможным дополнительным проникновением положительных ионов, прошедших отсекающую сетку, что связано с недостаточным положительным потенциалом в центральной области ячейки сетки.

В области отрицательного коллекторного тока можно выделить три участка: линейное увеличение отрицательного тока, резкий скачок вблизи нуля напряжений и дальнейший рост отрицательного тока в области положительных напряжений. Рост электронной компоненты в области насыщения отрицательного тока ($U_5 = 70$ В и более) объясняется захватом антидинаatronной сеткой эмитированных электронов, уменьшением количества поступающих на коллектор положительных ионов. Общая тенденция зависимости тока коллектора от напряжения на антидинаatronной сетке такова: при увеличении напряжения на антидинаatronной сетке уменьшается ток коллектора. Процессы, обуславливающие резкий скачок тока коллектора вблизи нуля являются предметом дополнительных исследований. Зависимость коллекторного тока от расхода обратная: при увеличении расхода газа (аргон) увеличивается ток электронной компоненты.

С увеличением расхода при исследовании положительной компоненты потока суммарный коллекторный



ток уменьшается (рис. 2в).

Сходство зависимостей тока коллектора от напряжения на антидинаatronной сетке при отсекающих напряжениях $U_3 = 0$ В и $U_3 = +300$ В объясняется пропусканием отсекающей сеткой части положительной компоненты, а также преобладанием отрицательной компоненты в потоке. Относительное увеличение ионной компоненты (рис. 2в) показывает, что электронная компонента в 10 раз превышает ионную.

Таким образом, исследование показывает присутствие значительного количества электронов в ионном потоке. Следовательно, соотношение между отрицательной и положительной компонентой потока является важной характеристикой в процессах синтеза нанопокровов, напыляемых ионными источниками.

Автор благодарит Борисова А.А. (НГУ) за помощь в проведении эксперимента и обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках Проекта САС-НГУ: «Нелинейная фотоника и квантовые технологии».

Список публикаций:

[1] Patterson M. M. et al // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2007. С. 16-257.

[2] Edelberg E. A., Aydil E. S. // *J. Appl. Phys.* 1999. № 9(86). С. 4799.

[3] Janes J., Huth C. // *J. Vac. Sci. Technol.* 1992. № 10(91). С. 3086.

Исследование электрического спектра ионного пучка источника типа End-hall

Захаров Степан Алексеевич

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Александр Степанович Золкин, к.ф.-м.н.

stepan.zakharov96@gmail.com

Ионные источники применяются сегодня для широкого круга задач, связанных с созданием новых материалов, исследованиями в ядерной физике, ионной микроскопии и многих других [1]. Наиболее важным параметром, который необходимо учитывать при работе с ионными источниками, является энергетическое распределение ионов в пучке источника. Именно средняя энергия ионов оказывает непосредственное влияние на характер и интенсивность физико-химических процессов, происходящих в мишени, следовательно, и на результат исследования [2]. Поэтому и необходимо знать функцию распределения ионов по энергиям для каждого конкретного ионного источника. Одним из самых точных и простых в реализации методов определения данной функции является метод задерживающего потенциала, который заключается в применении многосеточного зонда для измерения ионного тока пучка.

В данной работе проводятся измерения энергетического спектра ионного источника типа End-hall с помощью зонда задерживающего потенциала.

Можно выделить 2 параметра, которые необходимо знать для получения функции распределения ионов по энергиям: напряжение на задерживающей сетке V_{ion} и Ток коллектора ионов I_{ion} . Ток коллектора дает информацию о количестве частиц с определенным значением энергии в пучке. Зависимость $I_{ion}(V_{ion})$ выражена в формуле [1]:

$$I_{ion}(V_{ion}) = \frac{e^2 n P}{m_i} \int_{eV_{ion}}^{+\infty} f(E) dE$$

где I_{ion} - ионный ток, V_{ion} - напряжение на задерживающей сетке, e - заряд частицы, n - концентрация частиц, P - апертура зонда, E - энергия частиц.

Продифференцировав данное выражение, можно получить функцию распределения частиц плазмы по энергиям. В анализе экспериментальных данных использовалась упрощенная формула вида:

$$\frac{dI_{ion}}{dV_{ion}} \propto -f(E)$$

Для получения энергетического спектра ионного источника была экспериментально получена зависимость $I_{ion}(V_{ion})$. Производная по напряжению данной зависимости с точностью до константы является распределением ионов в пучке по энергиям.

Зонд, примененный в работе, построен по классической четырехсеточной схеме [5], представленной на рис. 1